



# Etude d'un circulateur auto-polarisé très faibles pertes à 40 GHz : Influence de la température

Vincent Laur, R Lebourgeois, E Laroche, Jean-Luc Mattei, Patrick Queffelec, J.P. Ganne, G. Martin

## ► To cite this version:

Vincent Laur, R Lebourgeois, E Laroche, Jean-Luc Mattei, Patrick Queffelec, et al.. Etude d'un circulateur auto-polarisé très faibles pertes à 40 GHz : Influence de la température. Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux, Mar 2016, Calais, France. hal-01302908

**HAL Id: hal-01302908**

**<https://hal.science/hal-01302908>**

Submitted on 15 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etude d'un circulateur auto-polarisé très faibles pertes à 40 GHz : Influence de la température

V. Laur<sup>1</sup>, R. Lebourgeois<sup>2</sup>, E. Laroche<sup>3</sup>, J.L. Mattei<sup>1</sup>, P. Queffelec<sup>1</sup>, J.P. Ganne<sup>2</sup>, G. Martin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest Cedex 3

<sup>2</sup> Thales Research & Technology France, 1 av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex

<sup>3</sup> Chelton Telecom & Microwave trading as Cobham Microwave, 29 av. de la Baltique, 91140 Villebon-sur-Yvette

Vincent.laur@univ-brest.fr

**Résumé—** Une étude en température d'un circulateur auto-polarisé très faibles pertes en bande millimétrique est proposée. Ce circulateur présente, à température ambiante et sans champ appliqué, des pertes d'insertion inférieures à 0,52 dB dans une bande-passante à -15 dB d'isolation de 4,1 GHz centrée sur 39 GHz. L'évolution des performances du circulateur entre 22°C et 115°C est présentée et discutée au regard des modifications des propriétés statiques du matériau dans cette gamme de température.

**Mots clés—** Circulateur, Guide rectangulaire, Hexaferrite, Mesures hyperfréquences

## I- INTRODUCTION

Les circulateurs sont des dispositifs non-réciproques couramment utilisés dans les architectures des front-ends RF et hyperfréquences pour se prémunir des problèmes de désadaptation d'impédance aux abords des circuits sensibles aux variations de puissance tels que les amplificateurs. Ils sont également fréquemment intégrés dans des systèmes full-duplex utilisant une antenne unique. L'intégration et le coût de ces dispositifs constituent encore à ce jour un frein à leur déploiement et des solutions à base de commutateurs RF ou de duplexeurs sont parfois privilégiées.

L'auto-polarisation, fonctionnalité accessible par l'utilisation de ferrites pré-orientés, constitue une voie de recherche prometteuse pour améliorer l'intégration de ces dispositifs. En effet, contrairement aux solutions classiques à base de ferrites doux, cette famille de circulateur ne requière pas l'utilisation d'aimants permanents pour obtenir l'effet non-réciproque recherché.

Des études ont permis d'en démontrer la faisabilité pour des fréquences allant de 12 à 40 GHz [1]-[5]. La plupart de ces démonstrateurs utilisent des céramiques d'hexaferrite de strontium SrM pré-orientés. Ces matériaux présentent un champ d'anisotropie  $H_A$  de l'ordre de 18 kOe qui limite les fréquences de fonctionnement de ce type de circulateur à des fréquences sensiblement inférieures à 40 GHz du fait de la proximité de la résonance gyromagnétique et des pertes associées.

Lors d'une étude précédente [6], [7], nous avons démontré qu'il était possible d'obtenir des performances acceptables autour de 40 GHz en utilisant un ferrite SrM dopé Lanthane-Cobalt dont le champ d'anisotropie atteint une valeur d'environ 20 kOe.

Dans cet article, nous présentons une version optimisée du circulateur auto-polarisé en guide WR-19 précédent [6], [7] qui nous a permis d'améliorer sensiblement les performances. Dans une première partie, le procédé d'optimisation sera présenté ainsi que les résultats de simulation associés. Puis, des caractérisations de ce dispositif en fonction de la température

seront présentées et discutées au regard des évolutions des propriétés statiques du ferrite en température.

## II- OPTIMISATION DU CIRCULATEUR

Les propriétés statiques et dynamiques de l'hexaferrite de strontium substitué Lanthane-Cobalt noté (La,Co)-SrM utilisé sont données dans le tableau 1. Ces propriétés ont été extraites à partir de rétro-simulations des réalisations précédentes [6], [7], et de caractérisations magnétiques statiques.

$M_S$ (G)	$H_k$ (kOe)	$M_r/M_S$	$\Delta H$ (Oe)	$\epsilon_r$
4240	19.75	0,88	400	21

**Tableau 1.** Propriétés statiques et dynamiques du ferrite (La,Co)-SrM

La simulation du circulateur auto-polarisé a été effectuée à l'aide du logiciel Ansys HFSS et du modèle de Polder intégré dans le simulateur, modèle qui n'est valide que pour des ferrites à l'état saturé. Néanmoins, les hexaferrites polycristallins pré-orientés peuvent présenter des taux de rémanence très élevés (plus de 90%) qui permettent de décrire leur comportement dynamique de façon relativement précise à partir de ce modèle comme cela a été démontré dans nos études précédentes [6].

Dans le cas d'un hexaferrite pré-orienté suivant l'axe z, les données d'entrée du modèle de Polder doivent être modifiées comme suit :

$$H_{int\ Polder} = H_{app} + H_A - N_z \times M_r \quad (1)$$

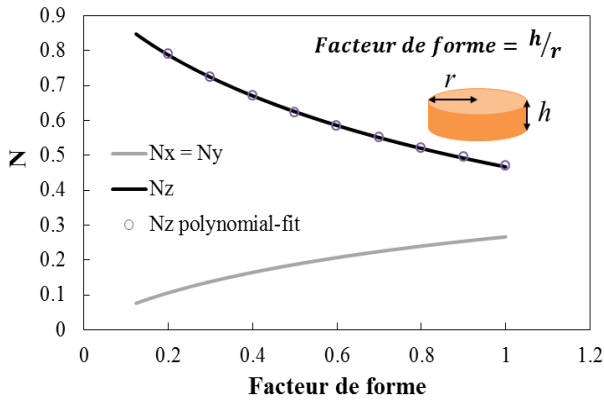
$$M_{Polder} = M_r \quad (2)$$

où  $H_{int\ Polder}$  est le champ interne dans le ferrite,  $H_{app}$  le champ magnétique appliqué,  $H_A$  le champ d'anisotropie,  $N_z$  le coefficient démagnétisant suivant z et  $M_r$  l'aimantation rémanente.

Les coefficients démagnétisants, qui sont dépendants du facteur de forme de l'échantillon de ferrite  $h/r$  (avec  $h$  la hauteur de la pastille et  $r$  son rayon), peuvent être calculés à partir du modèle d'Aharoni [8]. La figure 1 présente l'évolution de ces coefficients démagnétisants, en coordonnées cartésiennes, en fonction du facteur de forme de l'échantillon. L'évolution du coefficient  $N_z$  en fonction du facteur de forme peut être interpolée, dans la plage de facteurs de forme d'intérêt, à l'aide du polynôme suivant :

$$N_z = -0,22 \times \left(\frac{h}{r}\right)^3 + 0,683 \times \left(\frac{h}{r}\right)^2 - 0,945 \times \frac{h}{r} + 0,953 \quad (3)$$

En intégrant cette évolution du coefficient  $N_z$  ainsi que les équations (1) et (2) dans le simulateur électromagnétique, une optimisation automatisée de la structure peut être envisagée.



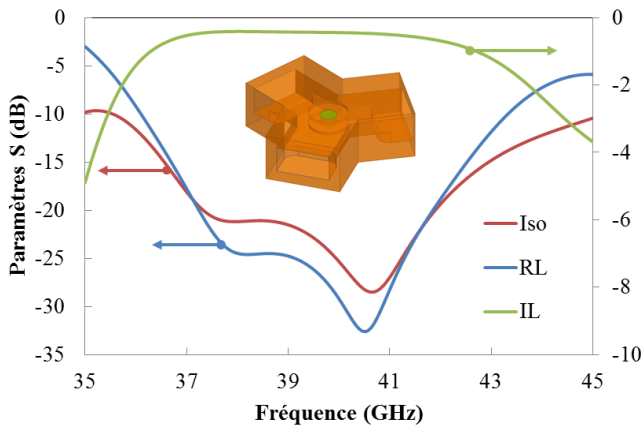
**Figure 1.** Coefficients démagnétisants ( $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$ ) en fonction du facteur de forme (traits pleins) ; interpolation polynomiale du coefficient  $N_z$  (cercles).

Cette méthodologie nous a permis d'optimiser la structure précédemment publiée.

Dans un premier temps, des simulations ont été menées, en modifiant uniquement la forme des pastilles de ferrite intégrées dans le circulateur sans changer les dimensions des parties métalliques, mais n'ont pas permis de démontrer d'amélioration notable des performances en raison du faible impact du facteur de forme sur le champ interne du matériau.

Dans un second temps, la structure complète a été optimisée, notamment les différents étages d'adaptation d'impédance, et ont permis d'obtenir une amélioration sensible des performances (Fig. 2). La structure optimisée intègre des pastilles d'hexaferrite présentant un facteur de forme de 0,411 ( $r = 0,73$  mm et  $h = 0,3$  mm). Dans ce cas, compte-tenu des effets démagnétisants, le champ interne dans le ferrite est de 17770 Oe.

Une bande-passante à -15 dB d'isolation de 16,9% (6,4 GHz) associée à des pertes d'insertion maximales dans la bande IL = 1,18 dB semble être accessible. Il est à noter que nos précédentes réalisations présentaient une bande-passante beaucoup plus limitée avec une valeur de l'ordre de 3% sans champ appliqué.



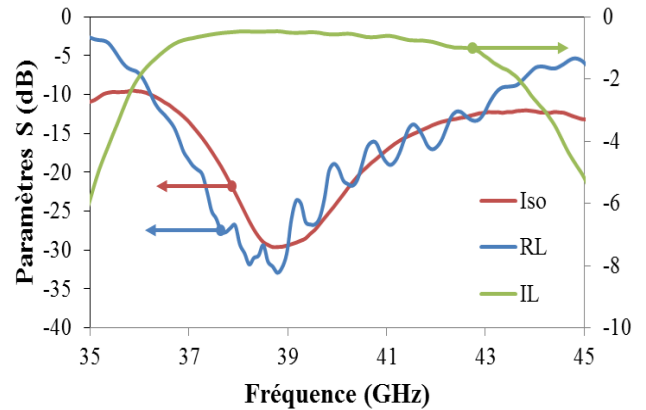
**Figure 2.** Paramètres  $S$  simulés de la version optimisée du circulateur en guide. Insert : Modèle de simulation.

Cette version optimisée du circulateur, intégrant une jonction-Y en guide d'onde WR-19 et deux pastilles de (La,Co)-SrM, a été réalisée et caractérisée en hyperfréquences en fonction de la température.

### III- CARACTERISATION DU CIRCULATEUR

La caractérisation du circulateur a été réalisée à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel (Rhode&Schwarz ZVA67) dans la bande 35-45 GHz.

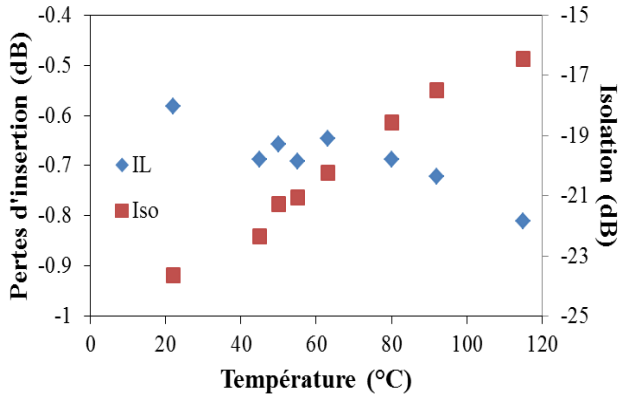
Une mesure préliminaire a permis d'observer le bon fonctionnement du circulateur avec néanmoins un léger décalage fréquentiel entre l'adaptation et l'isolation. Un post-réglage du dispositif a permis d'obtenir les paramètres  $S$  présentés sur la figure 3. En l'absence de champ appliqué, ce circulateur présente une bande-passante de 10,4% (4,1 GHz) associée à des pertes d'insertion inférieures à 0,69 dB sur l'ensemble de la bande. Ces pertes plus faibles que les valeurs prédites par la simulation s'expliquent principalement par le resserrement de la bande de fonctionnement autour de la fréquence centrale du dispositif. Il est à noter que des pertes minimales de 0,41 dB à 39 GHz ont pu être observées, à comparer aux 0,87 dB obtenue lors de nos études précédentes et qui constituaient déjà l'état de l'art sur le sujet.



**Figure 3.** Performances du circulateur en l'absence de champ appliqué dans la bande 35-45 GHz.

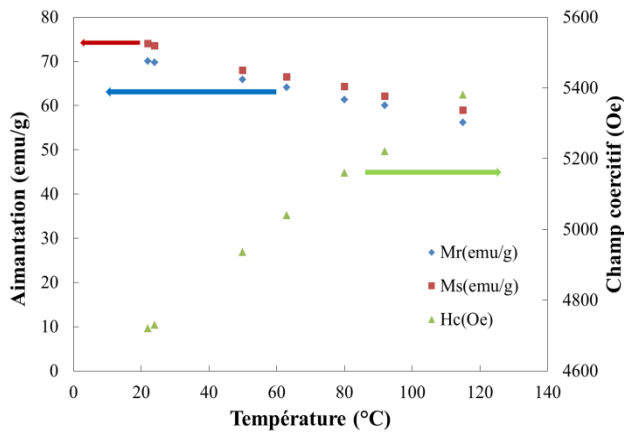
Le circulateur a ensuite été mesuré dans une gamme de température allant de l'ambient (22°C) à 115°C. La figure 4 présente l'évolution des pertes d'insertion et de l'isolation en fonction de la température à la fréquence de 40 GHz. Un léger accroissement des pertes d'insertion (0,23 dB) et une baisse de l'isolation d'environ 7 dB sont observés dans cette gamme de température. Malgré une baisse sensible de l'isolation, celle-ci reste inférieure à -15 dB jusqu'à 115°C.

En parallèle, des mesures des propriétés statiques des hexaferrites (La,Co)-SrM ont été réalisées sur la même gamme de température à l'aide d'un Vibrating Sample Magnetometer (VSM MicroSense, LotQuantum).



**Figure 4.** Evolution des pertes d'insertion et de l'isolation en fonction de la température à la fréquence de 40 GHz.

Les évolutions de l'aimantation à saturation, de l'aimantation rémanente et du champ coercitif corrigés des effets démagnétisants entre 22 et 115°C sont présentées sur la figure 5. Dans cette gamme de température, une diminution de 20% de l'aimantation rémanente est observée mais la diminution conjointe de l'aimantation à saturation permet de conserver un taux de rémanence autour de 90% jusqu'à 115°C. Ce phénomène semble être cohérent avec le fait que ce rapport est principalement lié à la pré-orientation des grains pendant le frittage. Dans le même temps, le champ coercitif  $H_C$  augmente d'environ 14%. Ces deux phénomènes simultanés sont représentatifs d'une augmentation de la « dureté » du matériau lorsque la température augmente.



**Figure 5.** Evolution de l'aimantation (rémanente et à saturation) et du champ coercitif intrinsèques du ferrite (La,Co)-SrM en fonction de la température.

En première approximation, le champ d'anisotropie est proportionnel à  $H_C$ . Ainsi, il est possible d'évaluer une valeur de champ d'anisotropie à 115°C d'environ 22500 Oe.

Un modèle de prédiction des pertes d'insertion de circulateurs à jonction-Y [9] a été utilisé pour calculer les pertes d'insertion théoriques du circulateur en fonction de la température. Dans ce modèle, les pertes d'insertion sont calculées à l'aide des formules suivantes :

$$IL \text{ (dB)} = 20 \log \left( 1 + \frac{(1+p^2)\alpha}{\sqrt{3}(1-p^2)} \right) \quad (4)$$

$$p(H_A, M_r, N_z, \Delta H, N_z) = \text{real}(\kappa) / \text{real}(\mu) \quad (5)$$

où  $\kappa$  et  $\mu$  sont les composantes extradiagonales et diagonales du tenseur de Polder qui sont dépendantes des propriétés du ferrite et de sa forme.  $\alpha$  est le coefficient d'amortissement du ferrite lié à la largeur de raie d'absorption à mi-hauteur  $\Delta H$ .

Sans champ appliqué et à température ambiante, ces équations prédisent des pertes d'insertion de 0,37 dB à 40 GHz. Une différence de 0,21 dB est observée par rapport aux mesures du dispositif. Ce résultat semble cohérent avec les résultats expérimentaux puisqu'il ne tient compte que des pertes magnétiques dans le ferrite. L'origine des pertes additionnelles semblent pouvoir être attribuée aux pertes métalliques du guide (pertes diélectriques dans le ferrite, très faibles dans notre cas) qui peuvent alors être considérées comme constante en fonction de la température.

A 115°C, des pertes magnétiques  $\Delta H$  de 760 Oe permettent de retrouver les pertes d'insertion mesurées. Cet accroissement des pertes magnétiques en fonction de la température est en accord avec des mesures réalisées sur des monocristaux d'hexaferrite de strontium [10].

#### IV- CONCLUSION

L'utilisation d'hexaferrites de strontium dopés a permis de réaliser un circulateur très faibles pertes en bande millimétrique. Sans champ appliqué, ce circulateur présente des pertes d'insertion de 0,41 dB à 39 GHz et une bande-passante supérieure à 4GHz. Les caractérisations en température ont permis de démontrer que l'isolation restait supérieure à 15 dB jusqu'à 115°C à la fréquence de 40 GHz sans augmentation significative des pertes d'insertion. Le comportement en température des propriétés statiques du matériau a également été étudié dans le but de corréler l'évolution des performances du dispositif en température aux évolutions des propriétés magnétiques du matériau.

Ce démonstrateur constitue un premier jalon dans la conception de circulateurs intégrés miniatures en bande millimétrique. Actuellement, nous travaillons à la réalisation de structures planaires ultra-compactes qui permettront de mettre en valeur les possibilités offertes par ces matériaux pour l'intégration des circulateurs.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par la DGCIS dans le cadre du projet européen Euripides intitulé MM\_WIN (Advanced Millimeter Wave Interconnects).

#### REFERENCES

- [1] J. Wang, A. Yang, Y. Chen, Z. Chen, A. Geiler, S.M. Gillette, V.G. Harris, C. Vittoria, "Self-biased Y-junction circulator at Ku band", IEEE Microwave Wireless Components Lett. **21-6** (2011), p. 292-294
- [2] J.A. Weiss, N.G. Watson, G.F. Dionne, "New Uniaxial-Ferrite Millimeter-Wave Junction Circulators", in Proc. IEEE Int. Micr. Symp., 1989, p. 145-148
- [3] M.A. Tsankov, L.G. Milenova, "Design of self-biased hexaferrite waveguide circulators", Journal of Applied Physics **73-10** (1993) p. 7018-7020
- [4] X. Zuo, H. How, S. Somu, C. Vittoria, "Self-biased circulator/isolator at millimeter wavelengths using magnetically oriented polycrystalline strontium M-type hexaferrite", IEEE Trans. Magnetics **39-5** (2003) p. 3160-3162

- [5] N. Zeina, H. How, C. Vittoria, R. West, “*Self-biasing circulators operating at Ka-band utilizing M-type hexagonal ferrites*”, IEEE Trans. Magnetics **28-5** (1992) p. 3219-3221
- [6] V. Laur, G. Vérissimo, P. Queffelec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, “*Self-biased Y-junction Circulators using Lanthanum- and Cobalt-substituted Strontium hexaferrites*” IEEE Trans. Micr. Th. & Tech., **63-12** (2015), p. 4376-4381
- [7] V. Laur, G. Vérissimo, P. Quéffelec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, J.C. Reihls, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, “*Modeling and characterization of self-biased circulators in the mm-wave range*”, in Proc. IEEE Int. Micr. Symp., 2015
- [8] A. Aharoni, “*Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms*”, Journal of Applied Physics 83-6 (1998) p. 3432-3434
- [9] J. Helszain, “*Nonreciprocal microwave junctions and circulators*”, Ed. Wiley, 1975
- [10] M. Labeyrie, J.C. Mage, T.M. Robinson, “*Characterization of strontium hexaferrite for millimeter wave applications*”, IEEE Trans. Mag., **22-5** (1986)